

Иванова Елена Валентиновна

**ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ЗАМЕНЫ
ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ ФАКТОРА
НАДЕЖНОСТИ**

Специальность 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством:
экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами:
промышленность

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук**

Екатеринбург - 2011

Работа выполнена на кафедре «Систем управления и экономики энергетики»
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования «Новосибирский государственный
технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Китушин Викентий Георгиевич
(Россия), профессор кафедры «Систем
управления и экономики энергетики»
Новосибирского государственного
технического университета, г. Новосибирск

Официальные оппоненты: доктор экономических наук, профессор
Клюев Юрий Борисович
(Россия), заведующий кафедрой
«Экономики энергетики и маркетинга»
Уральского федерального университета
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

кандидат экономических наук
Пыхов Павел Аркадьевич
(Россия), руководитель группы энергетической
безопасности и устойчивого социально-
экономического развития региона Института
экономики Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург

Ведущая организация: **Институт экономики и организации
промышленного производства СО РАН
(ИЭиОПП СО РАН), г. Новосибирск**

Защита состоится 27 октября 2011 г. в 10 час. 15 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.285.01 при Уральском федеральном
университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по адресу:
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, в зале заседаний ученого совета
(ауд. I римская).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского
федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

Автореферат разослан «26» сентября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Доктор экономических наук

А.Ю. Домников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Реформирование и реструктуризация энергетической отрасли привели к тому, что электросетевые компании были выделены в отдельный вид бизнеса, и хотя они действуют в естественно-монопольном секторе, повышение эффективности деятельности является неотъемлемым условием их существования и развития в современных условиях.

Основой деятельности электросетевых компаний является оборудование, состояние которого в настоящее время таково, что степень износа в среднем составляет 50 %, при этом наибольший износ имеет оборудование подстанций, который достигает 70 %. Такое состояние оборудования определяет то, что до 70 % и более себестоимости его содержания составляют затраты на ремонтное обслуживание (текущее, капитальное, аварийное), а также на компенсацию последствий отказов оборудования. Объем этих затрат, с одной стороны, зависит от состояния сетей (остаточного ресурса) и частоты отказов оборудования, с другой стороны, он оказывает существенное влияние на формирование тарифа на электрическую энергию и, как следствие, на эффективность экономики страны.

Существовавшая в СССР и до сих пор использующаяся в редуцированном виде на предприятиях система планово-предупредительного ремонта была ориентирована на высокий уровень надежности оборудования, обеспечение которого требовало значительных затрат. Существующие условия функционирования предприятий предполагают минимизацию затрат на ремонтное обслуживание оборудования в качестве одного из направлений повышения эффективности их деятельности.

В связи с вышесказанным актуальны следующие вопросы – до каких пор продолжать ремонтировать оборудование и когда заменять его на новое, какой режим ремонтного обслуживания считать оптимальным, как экономически обосновать принимаемые решения по затратам на оборудование?

Существующие модели оценки состояния оборудования и обоснования выбора вариантов воздействия (техническое обслуживание, ремонт, реконструкция, замена) опираются на информацию о каждой единице оборудования и не позволяют получать интегральную оценку состояния оборудования всего энергопредприятия, определять изменение этого состояния в зависимости от планируемых ремонтных воздействий (затрат). Поэтому необходима разработка новых моделей, которые позволят принимать обоснованные решения по управлению ремонтным обслуживанием и заменой оборудования на уровне всего предприятия (или группы однотипного оборудования).

Сегодня актуальность в наличии таких методов возрастает по многим направлениям:

- для акционеров и инвесторов – оценить общий уровень технического состояния оборудования предприятия, влияющего, в том числе, и на его капитализацию;
- для руководителей предприятия:

- обосновывать регулятору необходимый объём ремонтного фонда;
- определять ремонтную политику, целесообразность замены оборудования;
- оценивать ежегодную сработку технического ресурса оборудования в целом по предприятию или по группе однотипного оборудования в зависимости от размеров ремонтных воздействий (ремонтных затрат), срока эксплуатации;
- определять необходимые ремонтные затраты в зависимости от желаемой (или оптимальной) надежности работы,
- организовать ремонтное обслуживание по состоянию оборудования.

Степень разработанности проблемы. Вопросам повышения организационно-экономической эффективности обслуживания и обновления производственных фондов посвящены исследования Д.А. Андреева, Г.Е. Баженова, И.О. Волковой, В.Г. Горевского, В.К. Дедкова, А.Н. Евстафьева, В.Г. Журавлева, А.Н. Златопольского, Ю.Б. Ключева, А.Н. Назарычева, В.Р. Окорокова, С.Л. Прузнера, Б.Е. Ратникова, Н.А. Северцева, А.И. Таджибаева, А.И. Филатова, А.Г. Фишова, А.И. Ящуры и др.

Вопросам надежности и оценке состояния энергетического оборудования посвящены исследования Д.А. Андреева, Н.И. Воропая, Ю.Б. Гука, А.В. Гуськова, Ю.Н. Кучерова, К.Е. Милевского, М.Ш. Мисриханова, А.Н. Назарычева, Ю.Н. Руденко, В.Ф. Ситникова, В.А. Скопинцева, В.П. Тарана, И.А. Ушакова, Ю.Я. Чукреева, В.И. Эдельмана и др.

Несмотря на обширную базу исследований, существующие модели оценки состояния оборудования и планирования ремонтного обслуживания и замены оборудования основаны на оценке физико-химических, эксплуатационных факторов, влияющих на состояние оборудования, и нет моделей, которые бы учитывали взаимосвязь экономических воздействий и остаточного технического ресурса оборудования. Имеющиеся модели основаны на индивидуальном (пообъектном) подходе, т.е. требуют информации о каждой единице оборудования, что является очень затратным, с точки зрения временных и финансовых ресурсов. Соответственно, отсутствуют модели, которые бы позволили при минимальной исходной информации, оценить интегральное состояние оборудования предприятия и необходимый размер ремонтных затрат. Актуальность проблемы и необходимость разработок методического и практического характера предопределили выбор темы диссертационного исследования.

Целью исследования является разработка моделей планирования затрат на ремонтное обслуживание и замену оборудования электрических сетей с учетом фактора надежности.

Для достижения поставленной цели в работе поставлены следующие задачи:

- проанализировать существующие модели планирования технического обслуживания, ремонта и замены оборудования энергопредприятий, выявлены их положительные и отрицательные стороны;
- разработать модель определения оптимального остаточного технического ресурса и частоты отказов оборудования;

- разработать модель планирования затрат на ремонтное обслуживание оборудования в отношении плановых и аварийных ремонтов;
- разработать модель обоснования замены оборудования предприятия;
- разработать алгоритм принятия решений по формированию плана ремонтного обслуживания и замены оборудования предприятия;
- апробировать разработанные модели на реальном электросетевом предприятии.

Объектом исследования являются электросетевые компании.

Предметом исследования является процесс управления ремонтным обслуживанием и заменой оборудования электросетевого предприятия.

Теоретическую и методологическую основу исследования составили фундаментальные положения экономической теории, теории надежности, теории управления активами, системный подход, методы математического моделирования, анализа эффективности инвестиций.

Информационную базу исследования составили научные источники в виде данных и сведений из книг, монографий, журнальных статей, научных докладов и отчетов, материалов научных конференций и семинаров; нормативно-правовые акты Российской Федерации, статистические данные Государственного комитета по статистике Российской Федерации, отраслевые нормативные документы, отчетность и документы электросетевых компаний, опросы менеджеров предприятий, специализированные справочники и ресурсы сети Internet.

Научные результаты и их новизна:

- Разработана модель определения оптимального остаточного технического ресурса электросетевого оборудования, в основе которой лежит компромисс между затратами на плановые ремонты и затратами на аварийные ремонты, включающими компенсацию ущерба потребителям вследствие отказов оборудования. Данная модель учитывает изменение уровня остаточного ресурса в зависимости от затрат на ремонтное обслуживание и позволяет определять оптимальный остаточный ресурс для группы однородного оборудования предприятия электрических сетей (п.п. 1.1.19 паспорта специальности).
- Разработана модель планирования затрат на ремонтное обслуживание оборудования, основанная на поддержании оптимального уровня остаточного ресурса и частоты отказов в течение срока службы оборудования. Модель позволяет определять объем затрат на плановые и аварийные ремонты с момента ввода оборудования в работу и до окончания его эксплуатации (п.п. 1.1.4 паспорта специальности).
- Разработана модель обоснования замены оборудования предприятия, позволяющая определять возраст группы однородного оборудования (оптимальный возраст), при превышении которого с экономической точки зрения целесообразно осуществить замену части оборудования данной группы. Модель позволяет определять величину денежных средств, необходимых для замены оборудования с целью снижения

фактического возраста оборудования до оптимального уровня (п.п. 1.1.4 паспорта специальности).

- Разработан алгоритм принятия решений по формированию плана ремонтного обслуживания и замены оборудования предприятия, учитывающий, что на изменение уровня остаточного ресурса группы однородного оборудования влияет не только объем ремонтного обслуживания, а также замена части оборудования данной группы. Алгоритм определяет последовательность действий, необходимых для выбора вариантов воздействия (ремонт, замена, или их сочетание) на группу однородного оборудования, чтобы обеспечить оптимальный уровень остаточного ресурса (п.п. 1.1.4 паспорта специальности).

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения полученных результатов, позволяющих:

- определять оптимальные затраты на ремонтное обслуживание оборудования на протяжении всего срока службы, учитывая состояние оборудования (остаточный ресурс);
- оценивать сроки замены существующего оборудования и объем денежных средств, необходимых для замены оборудования предприятия.

Рекомендации относительно объемов и сроков проведения замены оборудования, ремонтных работ могут быть использованы в управленческой деятельности электросетевого предприятия.

Результаты исследования использованы в учебных курсах «Экономика энергетики», «Управление ремонтным обслуживанием энергопредприятия» и в квалификационных работах студентов.

Апробация результатов работы. Отдельные результаты исследования обсуждались на: конференции, приуроченной Дням науки НГТУ (Новосибирск, 2007); Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск, 2007); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2007); международном научном семинаре им. Ю. Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Иркутск, 2008); Всероссийской научно-технической конференции «Энергосистема: Управление, Конкуренция, Образование» (Екатеринбург, 2008); международном научном семинаре им. Ю. Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Санкт-Петербург, 2009); международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире» (Красноярск, 2010); Всероссийской молодёжной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2010); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2010).

Результаты исследования были использованы в рамках научно-исследовательского проекта РГНФ «Экономика ремонта, технического перевооружения и реконструкции предприятий» (проект № 08-02-00053а, 2008-2009 гг.).

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 9 публикациях общим объемом 3,4 печатных листа, в том числе 1 статья в журнале, включенном в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 публикации в материалах международных конференций, 4 публикации в материалах российских конференций.

Структура и объем диссертации соответствует поставленным целям и задачам и отражает логику рассматриваемых вопросов. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников, приложений. Объем основного текста составляет 156 страниц. В работе содержится 22 таблицы, 44 рисунка, 4 приложения. Список использованных источников содержит 144 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены степень разработанности проблемы, цель и задачи исследования, указаны предмет и объект исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведен анализ существующего состояния энергетической отрасли в области передачи электрической энергии, рассмотрены подходы к организации технического обслуживания и ремонта оборудования.

Приведен обзор и анализ существующих моделей по управлению оборудованием предприятий – определение оптимального срока эксплуатации, выбор системы технического обслуживания и ремонта. Показано, что данные модели обладают рядом существенных недостатков и не могут быть использованы в силу различных обстоятельств.

Во второй главе разработана модель обоснования замены оборудования предприятия, модель определения оптимального остаточного технического ресурса и частоты отказов оборудования, представлены модели оптимальных затрат на ремонтное обслуживание (минимальные за срок службы оборудования) для линий электропередачи и подстанционного оборудования. На основании разработанных моделей предложен алгоритм принятия решений по формированию плана ремонтного обслуживания и замены оборудования.

В третьей главе рассматриваются вопросы практического применения полученных результатов. С помощью предлагаемых в диссертационном исследовании моделей произведен расчет оптимального остаточного ресурса, проведен анализ на предмет необходимости замены оборудования и рассчитаны прогнозные значения затрат на ремонтное обслуживание. Все расчеты проведены для передаточных устройств и подстанционного оборудования.

Выполнен анализ зависимости вырабатываемых решений от различных влияющих факторов: нормы дисконта, удельного ущерба, оплачиваемого потребителям, и параметров нового оборудования.

В заключении сформулированы основные выводы, показаны наиболее существенные научные и практические результаты проведенного диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработана модель определения оптимального остаточного технического ресурса электросетевого оборудования, в основе которой лежит компромисс между затратами на плановые ремонты и затратами на аварийные ремонты, включающими компенсацию ущерба потребителям вследствие отказов оборудования. Данная модель учитывает изменение уровня остаточного ресурса в зависимости от затрат на ремонтное обслуживание и позволяет определять оптимальный остаточный ресурс для группы однородного оборудования предприятия электрических сетей.

В основе определения оптимального остаточного технического ресурса ($R_{\text{опт}}$) лежат следующие предпосылки. В реальности затраты на ремонтное обслуживание оборудования не являются постоянной величиной, а с течением времени возрастают. Данная ситуация связана с жизненным циклом оборудования и частотой отказов, то есть в процессе старения и износа оборудования частота отказов возрастает, и как следствие возрастают затраты на аварийный ремонт оборудования. Поэтому необходимо найти компромисс между затратами на проведение плановых ремонтов оборудования и затратами на проведение аварийно-восстановительных ремонтов, включающих ущерб от ненадежного энергоснабжения потребителей. Плановые ремонты влияют на уровень остаточного ресурса оборудования, а частота отказов определяет проведение аварийно-восстановительных ремонтов. Оба показателя (технический ресурс и частота отказов оборудования) являются показателями надежности, которые характеризуют такие свойства надежности как безотказность (показатель – частота отказов) и долговечность (показатель – технический ресурс). Имеющаяся взаимосвязь данных показателей с затратами на проведение ремонтов при моделировании позволяет учитываться фактор надежности.

Если рассматривать предприятие с точки зрения системного подхода, то оно может рассматриваться аналогично агрегату (или одной единице оборудования), который представляет собой некоторую целостность, состоящую из определенной совокупности узлов и элементов, взаимосвязанных между собой и выполняющих определенные функции. При планировании ремонтного обслуживания в целом по такому предприятию межремонтный период будет равен одному году.

В качестве критерия оптимальности используется минимум затрат за нормативный срок службы оборудования:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{T_a} a_t \cdot Z_t^{\text{рем}} + \sum_{t=1}^{T_a} a_t \cdot Z_t^{\text{ав}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где T_a – нормативный срок службы оборудования, $Z_t^{\text{рем}}$ – годовые затраты на плановый ремонт оборудования в t -ом году, $Z_t^{\text{ав}}$ – годовые затраты на аварийные ремонты оборудования в t -ом году, в данную составляющую включена также

годовая компенсация ущерба потребителям из-за отказов оборудования в t -ом году, a_t – коэффициент дисконтирования.

Для решения поставленной задачи были смоделированы следующие взаимосвязи.

Затраты на аварийные ремонты и компенсация ущерба потребителям зависят от частоты отказов оборудования:

$$Z_t^{\text{ав}} = (z_t^{\text{ав}} + y) \cdot \omega_t, \quad (2)$$

где $z_t^{\text{ав}}$ – затраты на один аварийный ремонт в году t , y – компенсация ущерба потребителям из-за одного отказа оборудования, ω_t – частота отказов оборудования в году t , которая в свою очередь зависит от остаточного технического ресурса оборудования.

Для установления связи между затратами на ремонт $Z_t^{\text{рем}}$ и частотой отказов ω_t воспользуемся двойной связью: между затратами на ремонты и остаточным техническим ресурсом, с одной стороны, и между ресурсом и частотой отказов, с другой стороны.

Ресурс оборудования является результатом трудовых и материальных затрат аналогично тому как и объем производства в функции Кобба-Дугласа. Таким образом, ресурс зависит от вложенных в оборудование затрат – от его стоимости, а если оно восстанавливаемое, то и от затрат на ремонты¹:

$$R_t^{\text{ост}} = 1 - \left[\left(1 - \Phi_d + \sum_{i=1}^{T_a} \bar{z}_i^{\text{рем}} \right) \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^t \Delta T_i}{T_a} \right)^{1/\alpha} - \sum_{i=1}^t z_i^{\text{рем}} \right]^{\alpha} \quad (3)$$

где Φ_d – относительная величина стоимости оборудования после демонтажа при эксплуатации T_a (измеряется в долях от первоначальной стоимости оборудования Φ_0), $z_i^{\text{рем}}$, $\bar{z}_i^{\text{рем}}$ – фактические и нормативные затраты на ремонтное обслуживание в i -том году (измеряются в долях от первоначальной стоимости оборудования Φ_0), ΔT_i – сработка ресурса в результате его использования в i -том году (измеряется в годах; при нормальном использовании $\Delta T_i = 1$ год), α – показатель, характерный для каждого вида оборудования (для линейного оборудования $\alpha = 1$, для подстанционного $\alpha = 2/3$).

Оптимизируя критериальную функцию (1) по ремонтным воздействиям в t -ом году и решив уравнение относительно $\frac{d\omega_t}{dR_t}$, получаем:

¹ Китушин, В.Г. Макродиагностика технического состояния оборудования / В.Г. Китушин, Ф.Л. Бык, Д.Е. Шерварли // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сб. науч. трудов. – Вып. 60: Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, А.И. Таджикибаев (ПЭИПК). – Спб. : «Северная звезда», 2010. – С. 480-486.

$$\frac{d\omega_t}{dR_t} = -\frac{E}{1+E} \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\Phi_0 \cdot (1 - R_t^{\text{ост}})^{\frac{1-\alpha}{\alpha}}}{\Phi_0 \cdot (R_t^{\text{ост}})^{1/\alpha} + y}. \quad (4)$$

где E – норма дисконта (норма дохода на капитал). Данная формула справедлива с учетом следующих ограничений: $E > 0$; $\alpha > 0$; $\Phi_0 > 0$; $R_t^{\text{ост}} > 0$; $y \geq 0$.

Для того, чтобы из выражения (4) определить значение оптимального ресурса, необходимо установить связь между частотой отказов и остаточным ресурсом.

Можно выделить три принципиально различные причины отказов оборудования: 1) отказы, обусловленные дефектами проектирования, изготовления, монтажа, наладки и т.д.; 2) отказы, обусловленные случайными внешними воздействиями, не связанными с состоянием оборудования; 3) отказы, обусловленные износом и старением оборудования. С точки зрения ремонтного обслуживания внимание заслуживают отказы третьего рода. На рис. 1 представлена характеристика интенсивности отказов для восстанавливаемого оборудования (на оси абсцисс отложена наработка оборудования t_n – календарное время за вычетом времени нахождения в ремонтах, T_p – межремонтный период).

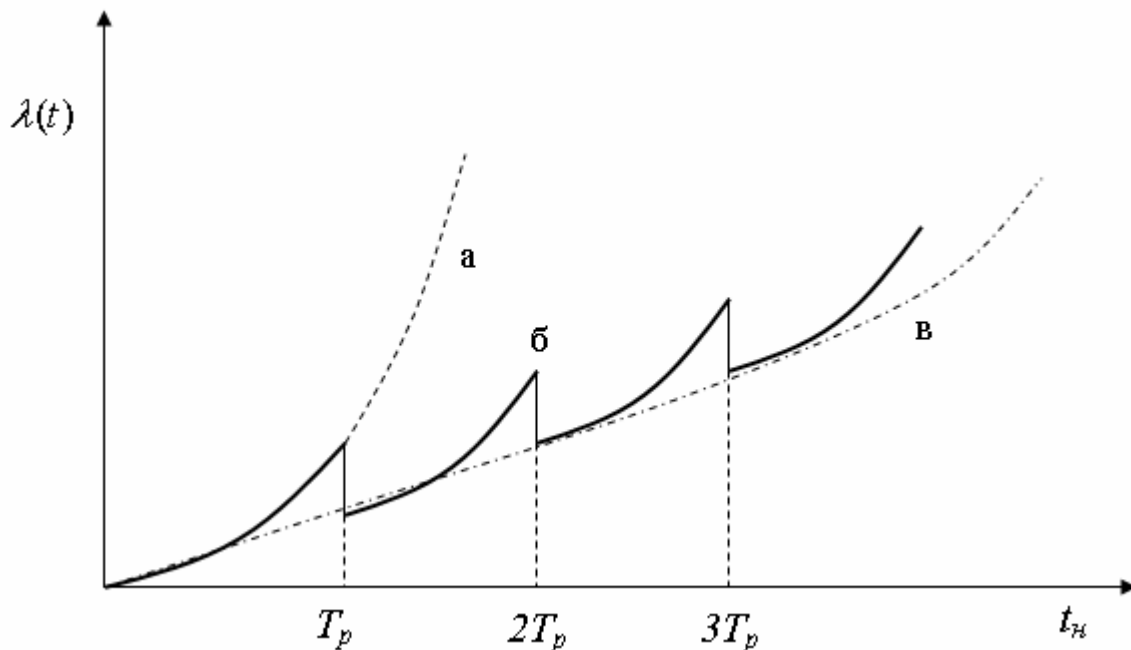


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов стареющего восстанавливаемого объекта при неполном восстановлении ресурса при плановых ремонтах.

Из рис. 1 видно, что интенсивность отказов изменяется пилообразно. Однако, если рассматривать процесс старения не для одной единицы оборудования, а для группы однородного оборудования предприятия, то межремонтный период будет равен 1 году, пилообразный вид сгладится и

примет вид возрастающей зависимости. Это связано с тем, что все оборудование вводится в эксплуатацию и ремонтируется одновременно, а так сказать «по очереди». Поэтому частота отказов может быть выражена одной составляющей, отражающей возрастающий характер зависимости.

$$\omega_t = \frac{1}{R_t^{\text{ост}} \cdot T_{\text{ж}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ж}}$ – время эксплуатации оборудования до полного невосстанавливаемого отказа при нормативной эксплуатации (срок жизни объекта, измеряется в годах):

$$T_{\text{ж}} = \left(\frac{1 + \sum_{i=1}^{T_a} \bar{3}_i^{\text{рем}}}{1 - \Phi_{\partial} + \sum_{i=1}^{T_a} \bar{3}_i^{\text{рем}}} \right)^{\alpha} \cdot T_a. \quad (6)$$

Для решения уравнения (4) необходимо использовать производную частоты отказов:

$$\frac{d\omega_t}{dR_t^{\text{ост}}} = -\frac{1}{\left(R_t^{\text{ост}}\right)^2 \cdot T_{\text{ж}}}. \quad (7)$$

Совместное решение (4) и (7) определит оптимальное значение остаточного ресурса оборудования. Частоту отказов соответствующую оптимальному ресурсу определим по выражению (5).

На рис. 2 приведена зависимость (4) при $y = 0$ для линий электропередачи ($\alpha = 1$) и зависимости (7) при различных значениях T_a . Точки пересечения последних с зависимостью (4) и определяют оптимальное значение остаточного ресурса. Расчеты показывают, что для передаточных устройств с $T_a = 25$ лет $R_{\text{онм}} = 0,33 \text{ о.е.}$

2. Разработана модель планирования затрат на ремонтное обслуживание оборудования, основанная на поддержании оптимального уровня остаточного ресурса и частоты отказов в течение срока службы оборудования. Модель позволяет определять объем затрат на плановые и аварийные ремонты с момента ввода оборудования в работу и до окончания его эксплуатации.

Модель определения оптимального остаточного технического ресурса электросетевого оборудования позволяет планировать деятельность предприятия в отношении оптимальных затрат на ремонтное обслуживание оборудования. Поддерживая величину остаточного ресурса на уровне оптимального можно достигнуть минимальных затрат на ремонт оборудования за его срок службы. Это означает, что если $R^{\text{ост}} > R_{\text{опт}}$, то надо снизить ремонтные затраты так, чтобы изменение ресурса стало отрицательным и равным $\Delta R = R_{\text{опт}} - R^{\text{ост}}$. Другими словами, в начале эксплуатации объекта, когда остаточный ресурс близок к единице, а оптимальный напротив значительно меньше единицы, нет

необходимости в ремонтных затратах до тех пор пока R не приблизится к $R_{\text{опт}}$. Ситуация совершенно обратная, когда $R^{\text{ост}} < R_{\text{опт}}$. Здесь, наоборот, необходимы значительные ремонтные затраты, чтобы увеличить остаточный ресурс до величины, близкой к $R_{\text{опт}}$. После того, как объект оказался в оптимальном состоянии (по ресурсу), приращение его ресурса на каждом последующем интервале времени должно стать нулевым. Размер ремонтных затрат в любом из этих случаев можно определить исходя из зависимости (3) при необходимом ΔR . Таким образом, решается задача планирования оптимальных затрат на ремонтное обслуживание оборудования.

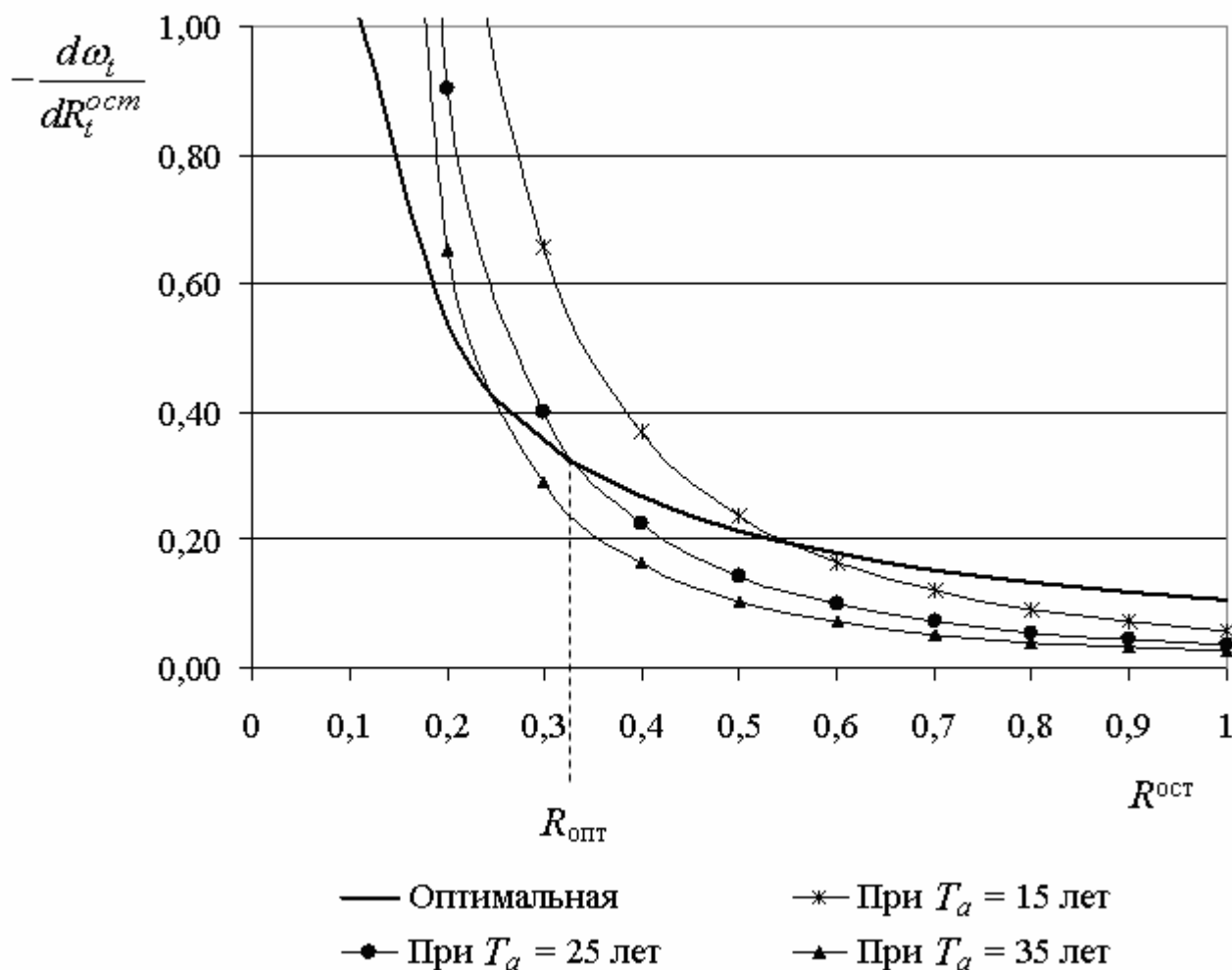


Рис. 2. Определение оптимального остаточного ресурса оборудования при различных значениях T_a и $y = 0$ для передаточных устройств.

3. Разработана модель обоснования замены оборудования предприятия, позволяющая определять возраст группы однородного оборудования (оптимальный возраст), при превышении которого с экономической точки зрения целесообразно осуществить замену части оборудования данной группы. Модель позволяет определять величину денежных средств, необходимых для замены оборудования с целью снижения фактического возраста оборудования до оптимального уровня.

В качестве критерия оптимальности был выбран минимум совокупных затрат.

$$Z_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{T_{\text{зам}}} a_t \cdot Z_t + \sum_{n=0}^{\infty} \left(K + \sum_{t=1}^{T_a} a_t \cdot Z_t^* \right) \cdot \left(\frac{1}{1+E} \right)^{T_{\text{зам}}+n \cdot T_a} \rightarrow \min, \quad (8)$$

где a_t – коэффициент дисконтирования, E – норма дисконта, K – капиталовложения (стоимость нового оборудования или стоимость реконструкции с учетом монтажа), Z_t, Z_t^* – соответственно затраты на ремонтное обслуживание существующего и нового оборудования, которые включают в себя затраты на плановый и аварийный ремонты, $T_{\text{зам}}$ – год замены существующего оборудования, T_a – нормативный срок службы нового оборудования, n – число циклов использования оборудования за временной интервал.

$$n = \frac{t}{T_a}, \quad t \rightarrow \infty. \quad (9)$$

Срок функционирования предприятия теоретически устремлен к бесконечности. Такое предположение является вполне допустимым для учета последствий. Кроме того, при использовании дисконтных методов наибольшее влияние на результирующий показатель оказывают ближайшие к началу реализации проекта годы.

Функции Z_t, Z_t^* являются неубывающими, так как если на плановый ремонт средства не тратятся, то сразу же увеличиваются затраты на аварийный ремонт, и наоборот, если мы вкладываем средства в плановый ремонт оборудования, то затраты на аварийный ремонт не возрастают. Данная ситуация связана с жизненным циклом оборудования и частотой отказов, то есть в процессе старения и износа оборудования частота отказов возрастает, и как следствие возрастают затраты на аварийный ремонт оборудования.

Определяя минимум критериальной функции (8) по параметру $T_{\text{зам}}$, получим следующее уравнение:

$$Z_{T_{\text{зам}}} = \ln(1+E) \cdot \frac{(1+E)^{T_a}}{(1+E)^{T_a} - 1} \cdot \left(K + \sum_{t=1}^{T_a} a_t \cdot Z_t^* \right). \quad (10)$$

При выполнении равенства (10) предприятию безразлично – продолжать эксплуатировать существующее оборудование, либо заменять его на новое.

Если рассматривать как частный случай ситуацию, когда затраты на ремонтное обслуживание нового оборудования постоянны, и учетом некоторых преобразований, можно получить следующий известный критерий:

$$Z_{T_{\text{зам}}} - Z^* > E \cdot K. \quad (11)$$

Формула (11) показывает, что замена действующего объекта экономически целесообразна, если экономия издержек от замены существующего оборудования новым больше годовой доходности капитала.

Как уже говорилось, затраты на ремонтное обслуживание оборудования с течением времени возрастают, что связано со старением оборудования. Поэтому,

чтобы воспользоваться критерием (10) необходимо определить затраты на ремонт нового оборудования за нормативный срок службы. Для этого нужно иметь информацию не только о стоимости оборудования, а также о нормативном сроке службы и среднегодовых затратах на ремонтное обслуживание, которая может быть предоставлена производителем оборудования.

Далее определим величину инвестиций, необходимых для замены оборудования предприятия. Для этого воспользуемся таким показателем как средний возраст оборудования:

$$T_{срt} = \frac{\Phi_{\Sigma амt} + \Phi'_t \cdot \left(1 + \frac{p}{T_a}\right)}{\Phi_t} \cdot T_a, \quad (12)$$

где $T_{срt}$ – средний возраст оборудования в год t , T_a – амортизационный период, $\Phi_{\Sigma амt}$ – накопленная амортизация к году t , Φ_t – балансовая стоимость оборудования в год t , Φ'_t – балансовая стоимость оборудования в год t , амортизация на которое уже не начисляется, p – срок, который отработало оборудование сверх амортизационного периода.

Рассчитав средний возраст оборудования по годам и имея информацию о затратах на ремонтное обслуживание существующего оборудования, можно определить оптимальный возраст оборудования предприятия, при котором выполняется условие (10) (рис. 3).

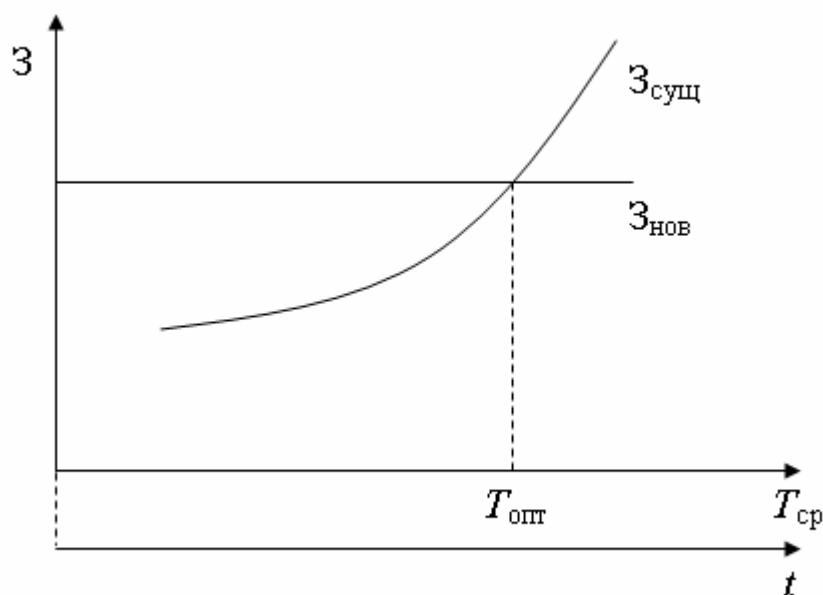


Рис. 3. Определение оптимального возраста оборудования.

На рис. 3 используются следующие обозначения: $Z_{сущ}$ – затраты на ремонтное обслуживание существующего оборудования, соответствующие среднему возрасту оборудования предприятия в год t , $Z_{нов}$ – стоимость нового

оборудования и суммарные дисконтированные затраты на его ремонт за срок службы.

Если определено, что замена части оборудования необходима, это значит, что средний возраст уже превышает $T_{\text{опт}}$. Таким образом, из формулы (12) можно определить объем инвестиций, необходимых для того, чтобы $T_{\text{ср}}$ соответствовал $T_{\text{опт}}$. При этом возможны три случая.

1. При покупке нового оборудования заменяются та часть оборудования предприятия, амортизация на которую уже не начисляется, т.е. оборудование, которое эксплуатируется сверх нормативного срока службы. В данном случае уменьшается величина Φ'_t , при этом сумма накопленной амортизации и балансовая стоимость оборудования не изменяются.

$$T_{\text{опт}} = \frac{\Phi_{\Sigma \text{ам}_t} + (\Phi'_t - \Delta \Phi'_t) \cdot \left(1 + \frac{p}{T_a}\right)}{\Phi_t} \cdot T_a, \quad (13)$$

где $\Delta \Phi'_t$ – балансовая стоимость оборудования, эксплуатирующегося сверх нормативного срока службы, которое необходимо вывести из эксплуатации. Данная величина также равна стоимости нового оборудования, которое нужно приобрести для замены.

$$\Delta \Phi'_t = \Phi'_t - \frac{T_{\text{опт}} \cdot \Phi_t - \Phi_{\Sigma \text{ам}_t} \cdot T_a}{T_a + p}. \quad (14)$$

2. При покупке нового оборудования заменяется оборудование, амортизация на которое еще начисляется, т.е. изменяется величина $\Phi_{\Sigma \text{ам}_t}$. Такая ситуация возможна в двух случаях:

- на предприятии нет оборудования, эксплуатирующегося сверх нормативного срока службы, т.е. $\Phi'_t = 0$;

- в силу различных факторов необходима замена оборудования, которое имеет не наибольший срок эксплуатации на предприятии. Например, из-за различий в условиях эксплуатации, объемах ремонтов, проводимых в течение срока службы, состояние более молодого оборудования может быть гораздо хуже, чем того, которое эксплуатируется сверх нормативного срока.

3. Для того чтобы изменить $T_{\text{ср}}$ данный случай не предусматривает какой-либо замены оборудования, а представляет собой некий вариант развития предприятия – количественное увеличение оборудования, т.е. для достижения $T_{\text{опт}}$ изменяется параметр Φ_t .

Для случаев 2 и 3 определение величины инвестиций производится аналогично случаю 1 на основании формулы (12) путем изменения необходимого параметра.

4. Разработан алгоритм принятия решений по формированию плана ремонтного обслуживания и замены оборудования предприятия, учитывающий, что на изменение уровня остаточного ресурса группы однородного оборудования влияет не только объем ремонтного

обслуживания, а также замена части оборудования данной группы. Алгоритм определяет последовательность действий, необходимых для выбора вариантов воздействия (ремонт, замена, или их сочетание) на группу однородного оборудования, чтобы обеспечить оптимальный уровень остаточного ресурса.

На основании моделей, представленных выше, был сформирован алгоритм принятия решений, который четким образом определяет последовательность действий руководителя по управлению ремонтным обслуживанием и заменой оборудования предприятия (рис. 3).

Предлагаемый алгоритм подразумевает осуществление следующих шагов:

1. Определение оптимального остаточного ресурса $R_{\text{опт}}$ и фактического остаточного ресурса $R_t^{\text{ост}}$.

2. Следующим шагом является сравнение оптимального и фактического остаточного ресурса. В случае, если фактический ресурс больше или равен оптимальному, то сразу переходим к шагу 9. Это означает, что в рассматриваемом периоде плановый ремонт, связанный с увеличением уровня остаточного ресурса, проводить не нужно. В противном случае переходим к следующему шагу.

3. Проводится анализ на предмет необходимости замены оборудования, т.е. на данном шаге определяется, что выгоднее с экономической точки зрения – продолжать эксплуатировать существующее оборудование или заменить его на новое.

4. Если на шаге 3 было определено, что замена оборудования не нужна, то переходим к шагу 8, иначе переходим к следующему шагу.

5. Производится определение величины денежных средств, необходимых для замены оборудования (формулы (12)-(14)). При этом после замены части оборудования на предприятии средний возраст оборудования $T_{\text{ср}}$ должен быть равен $T_{\text{опт}}$.

6. В результате замены части оборудования среднее значение остаточного ресурса рассматриваемой группы оборудования повышается. Однако этого может быть недостаточно для того, чтобы оно достигло оптимального уровня. Определить изменение $R_t^{\text{ост}}$ можно, построив зависимость остаточного ресурса от среднего возраста оборудования и зная $T_{\text{опт}}$.

7. Если фактический ресурс после замены части оборудования больше или равен оптимальному, то переходим к шагу 9, если же меньше – переходим к следующему шагу.

8. В следующем году плановый ремонт (связан с поддержанием или повышением величины остаточного ресурса) проводить не нужно. Таким образом, затраты следующего года будут связаны с аварийным ремонтом и текущим ремонтом, не влияющим на изменение ресурса оборудования.

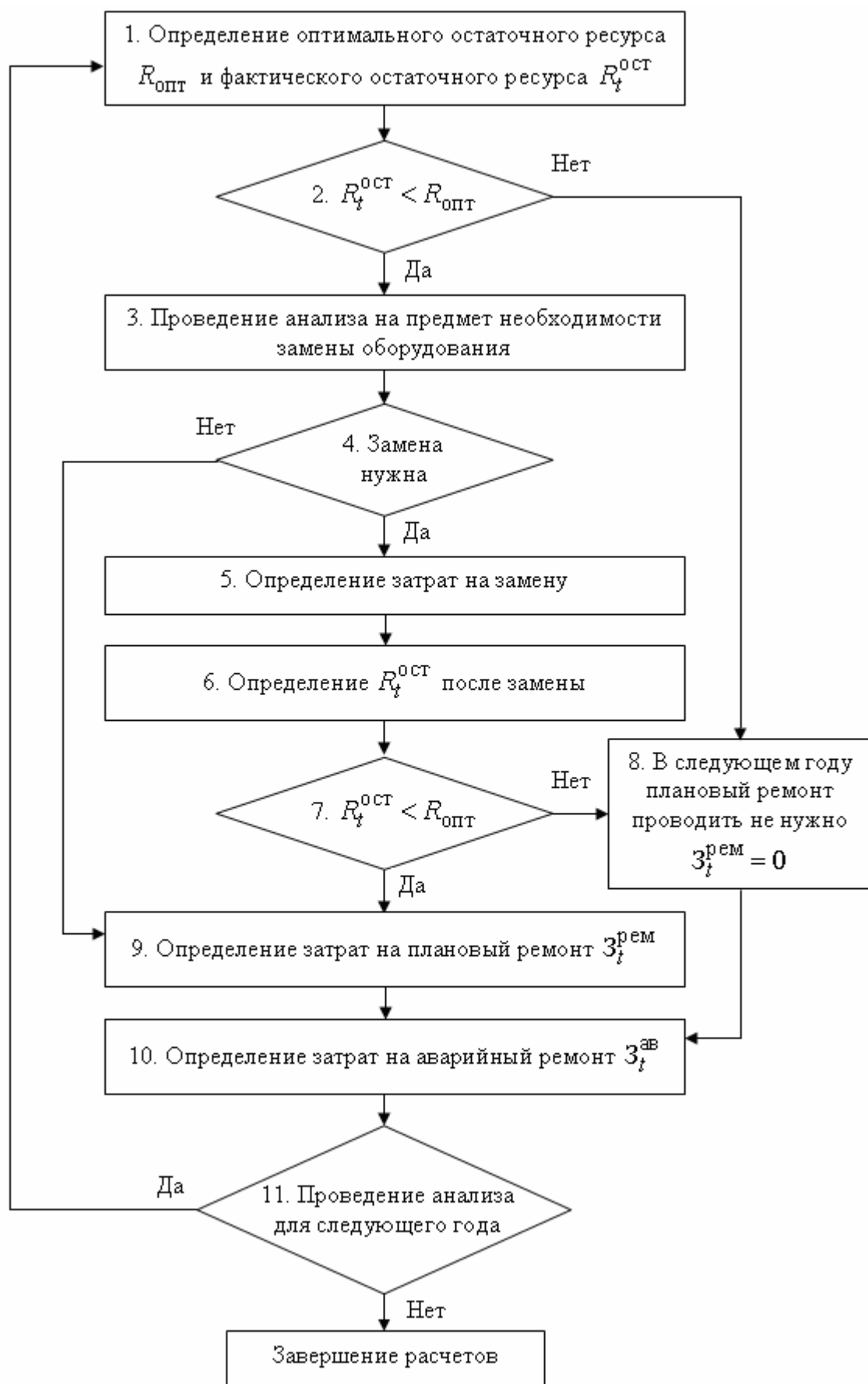


Рис. 3. Алгоритм принятия решений по формированию плана ремонтного обслуживания и замены оборудования предприятия.

9. Определяются затраты на плановый ремонт $Z_i^{\text{рем}}$ (на основании зависимости (3)) для того, чтобы поднять величину фактического остаточного ресурса до уровня оптимального. После определения $Z_i^{\text{рем}}$ можно найти ожидаемые затраты на аварийные ремонты, для этого переходим к шагу 10.

10. Рассчитываются затраты на аварийные ремонты (формула (2)) исходя из прогнозируемой частоты отказов, соответствующей данному уровню остаточного ресурса. В данном случае шаг является заключительным для данного года.

11. После шага 10 дальнейший анализ может проводиться на основании этой же схемы, начиная с первого шага, но уже для следующего года. При этом для анализа необходимо использовать данные, полученные при расчете предыдущего периода. Однако, если в следующем году будет производиться ввод или выбытие оборудования, то это повлияет на величину остаточного ресурса. Следовательно, при планировании этот факт необходимо учитывать.

В результате использования предлагаемого алгоритма, основанного на применении разработанных в диссертационном исследовании моделей, получаем для рассматриваемого периода времени:

- величину остаточного ресурса оборудования (она либо выше, либо равна оптимальному);
- частоту отказов оборудования, соответствующую остаточному ресурсу;
- величину денежных средств, необходимых для замены оборудования (если замена необходима);
- затраты на плановые и аварийные ремонты.

Таким образом, данная методика позволяет получить оптимальный план ремонтного обслуживания и замены оборудования предприятия на основании небольшого объема информации – фактические затраты на ремонтное обслуживание (за последние 2-3 года), статистика отказов, сумма накопленной амортизации и балансовая стоимость оборудования, показатели нового оборудования (стоимость, срок службы, нормативные затраты на ремонтное обслуживание).

На основании предложенного алгоритма и разработанных моделей был произведен расчет для передаточных устройств и подстанционного оборудования.

В группе передаточных устройств рассматривались воздушные линии 0,4 кВ, 6 кВ, 10 кВ и кабельные линии 0,4 кВ, 6 кВ, 10 кВ. Результаты расчетов показали, что в рассматриваемом году (2006 год) фактическое значение остаточного технического ресурса составляло 0,381 о.е., в то время как значение оптимального ресурса равно 0,33 о.е. Поскольку фактический ресурс превышает оптимальный уровень, то ремонт, связанный с изменением величины ресурса, в следующем году проводить не требуется. Таким образом, затраты следующего года связаны только с текущим ремонтом, не влияющим на изменение уровня ресурса, и аварийным ремонтом. Прогнозное значение затрат на ремонтное обслуживание оборудования в 2007 году составило 69240 тыс. руб. (9,1 % от балансовой стоимости). Экономия затрат на эксплуатацию оборудования в

2007 году по сравнению с 2006 годом составляет 45 %.

В группе подстанционного оборудования рассматривались трансформаторные подстанции 6-10/0,4 кВ и распределительные пункты 6-10/0,4 кВ. Результаты расчетов для подстанционного оборудования показали, что в 2006 году фактическая величина остаточного ресурса составляла 0,196 о.е., в свою очередь оптимальный уровень равен 0,22 о.е. Так как фактический ресурс оказался ниже оптимального, был проведен анализ на предмет необходимости замены части оборудования, который показал, что на рассматриваемый момент времени замену оборудования проводить не требуется, поскольку затраты на ремонтное обслуживание не превышают критический уровень (по критерию (10)). Однако для достижения оптимального ресурса необходимо провести плановый ремонт, с учетом которого общие затраты на ремонтное обслуживание подстанционного оборудования в 2007 году составят 57178 тыс. руб. (16,6 % от балансовой стоимости).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих моделей планирования ремонтного обслуживания и замены оборудования показал, что они основаны на информации о физических и технических параметрах объекта и требуют данных о каждой единице оборудования, что является ограничением для их практического применения.

2. Разработанная в диссертации модель определения оптимального остаточного технического ресурса и частоты отказов оборудования позволяет находить значения ресурса и частоты отказов, при которых достигается такое сочетание затрат на плановые и аварийные ремонты, которое обеспечивает минимальные затраты на ремонтное обслуживание.

3. Предложена модель планирования затрат на ремонтное обслуживание оборудования, основанная на том, что в течение срока службы оборудования необходимо поддерживать остаточный ресурс на уровне оптимального. Данная модель, учитывает взаимосвязь частоты отказов, остаточного ресурса с затратами на ремонт, таким образом позволяя учитывать фактор надежности через показатели безотказности и долговечности.

4. Модель обоснования замены оборудования предприятия позволяет определять возраст группы однородного оборудования (или оборудования в целом по предприятию), при превышении которого с экономической точки зрения целесообразно осуществить замену части оборудования данной группы.

5. Алгоритм принятия решений по формированию плана ремонтного обслуживания и замены оборудования предприятия позволяет определять на предстоящий и последующие годы вариант воздействия (ремонт, замена или их сочетание) на группу однородного оборудования и в соответствии с этим планировать затраты на ремонтное обслуживание (как в отношении плановых, так и аварийных ремонтов) и замену оборудования.

6. Апробация разработанных моделей на основе реальных данных показала возможность их практического применения для целей планирования и оценки деятельности электросетевого предприятия в отношении ремонтного

обслуживания и замены оборудования. С помощью разработанных моделей был определен оптимальный остаточный ресурс для передаточного и подстанционного оборудования, а также ремонтные затраты, необходимые для достижения оптимального уровня ресурса.

7. Предложенные в диссертации модели развивают методическую базу управления ремонтным обслуживанием и заменой оборудования и обеспечивают сокращение затрат на основную деятельность электросетевого предприятия.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Китушин, В.Г. Оценка эффективного срока реконструкции, замены оборудования [Текст] / В.Г. Китушин, Е.В. Иванова // Проблемы современной экономики. – 2008. – № 4. – С. 213–216 (0,42 п.л., в т.ч. автора 0,22 п.л.).

Научные работы, опубликованные в других изданиях:

2. Китушин, В.Г. Учёт фактора надёжности при определении эффективного срока эксплуатации оборудования электрической сети [Текст] / В.Г. Китушин, Е.В. Иванова // Энергетика: экология, надёжность, безопасность: материалы тринадцатой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – С. 187–190 (0,42 п.л., в т.ч. автора 0,21 п.л.).

3. Иванова, Е.В. Система планирования затрат на ремонтное обслуживание, техническое перевооружение, реконструкцию и замену оборудования предприятий электрических сетей с учетом состояния его изношенности [Текст] / Е.В. Иванова // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. – Ч. 4. – С. 149–152 (0,25 п.л.).

4. Китушин, В.Г. Анализ эксплуатационных затрат электросетевого предприятия как основа решений по его развитию [Текст] / В.Г. Китушин, Е.В. Иванова // Энергосистема: управление, конкуренция, образование: сборник докладов III международной научно-практической конференции. В 2 т. – Екатеринбург : УГТУ–УПИ, 2008. – Т. 2. – С. 270–274 (0,5 п.л., в т.ч. автора – 0,25 п.л.).

5. Китушин, В.Г. Определение оптимального уровня надежности оборудования электрической сети [Текст] / В.Г. Китушин, Е.В. Иванова // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сборник научных трудов международного научного семинара. – Вып. 59: Методические и практические проблемы надежности либерализованных систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2009. – С. 311–315 (0,54 п.л., в т.ч. автора – 0,27 п.л.).

6. Китушин, В.Г. К планированию ремонтного обслуживания оборудования предприятия электрических сетей [Текст] / В.Г. Китушин, Е.В. Иванова // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: сборник научных трудов международного научного семинара. – Вып. 60: Методы и средства исследования и обеспечения надежности систем энергетики /

отв. ред. Н.И. Воропай, А.И. Таджибаев (ПЭИПК). – Спб. : «Северная звезда», 2010. – С. 26–30 (0,32 п.л., в т.ч. автора – 0,16 п.л.).

7. Китушин, В.Г. Макродиагностика как средство планирования оптимальных объемов ремонтов и модернизации оборудования энергопредприятия [Текст] / В.Г. Китушин, Ф.Л. Бык, Е.В. Иванова // Энергетика в глобальном мире: сборник тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск : ООО «Версо», 2010. – С. 25–26 (0,25 п.л., в т.ч. автора – 0,1 п.л.).

8. Иванова, Е.В. Эффективность диагностики оборудования [Текст] / Е.В. Иванова, В.Г. Китушин // Электроэнергетика глазами молодежи: сборник статей всероссийской научно-технической конференции. В 2 т. – Екатеринбург : УрФУ, 2010. – Т. 2. – С. 321-325 (0,58 п.л., в т.ч. автора – 0,29 п.л.).

9. Иванова, Е.В. Анализ и сравнение основных понятий, связанных с категорией «активы» [Текст] / Е.В. Иванова // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 4-х частях. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – Ч. 3. – С. 67-69 (0,12 п.л.).